

CAN-over-Ethernet을 이용한 차량용 PLCA 이더넷 성능평가

민지현*, 정소영*, 박영일^o

Performance Evaluation of Automotive PLCA Ethernet Using CAN-over-Ethernet (CoE)

Jihyeon Min*, Soyoung Jeong*, Youngil Park^o

요약

자율주행, 전기차 등으로 차량에 들어가는 ECU의 개수와 통신 속도가 증가하면서 차량용 통신 역시 많은 변화가 이루어지고 있다. 기존에 주로 사용되었던 Controller Area Network (CAN) 2.0 방식은 최대 1 Mbps라는 낮은 속도의 한계를 가지고 있다. 반면, 차량용 이더넷은 CAN 통신보다 고속으로 대용량의 데이터를 전송할 수 있지만 기존에 사용하던 버스 구조의 통신 방식과는 다른 스타 구조로 인해 다수 개 스위치와 복잡한 배선이 필요하며, 단독으로 사용하기에는 어려움이 있다. 따라서 현재는 CAN 통신과 차량용 이더넷이 장치별로 구분되어 함께 사용되고 있다. 본 논문에서는 IEEE 802.3cg에서 표준화된 10Base-T1S 이더넷을 이용해 CAN 통신과 이더넷을 통합하는 네트워크를 제안한다. 통합된 네트워크에서 CAN 신호는 이더넷 패킷으로 변환되어 10Base-T1S 이더넷 버스를 통해 다른 노드와 연결된다. 한편, 이더넷 프로토콜에 의해 발생할 수 있는 CAN 패킷 시간 지연 문제는 우선순위를 부여한 Physical Layer Collision Avoidance 방식을 적용하여 해결하였으며, 시뮬레이션을 통해 제안한 차량용 이더넷통신의 성능을 검증하였다.

Key Words : Vehicular communications, CAN communications, CAN-over-Ethernet (CoE), PLCA Ethernet, Latency

ABSTRACT

As the number of ECUs and data rate increase with autonomous driving and electric vehicles, many changes are being made to vehicular communications. The CAN (Controller Area Network) 2.0 method, which was mainly used in the past, has a limitation in that it can send only a small amount of data at a low speed of up to 1 Mbps. On the other hand, automotive Ethernet can transmit a large amount of data at a higher speed than CAN communications, but it is difficult to use it alone due to its network topology different from the conventional networks, the need for many switches, and the complexity of wiring. Therefore, currently, CAN communication and automotive Ethernet are separated within the vehicle and are used by configuring different networks. In this paper, we propose a network that integrates CAN communication and Ethernet using 10Base-T1S Ethernet. In the integrated network, CAN signals are converted into Ethernet packets and

※ 본 연구는 한국연구재단 기본연구지원사업(NRF-2021R1F1A1048227)의 지원으로 수행되었습니다.

♦ First Author : Electronics Engineering Department, Kookmin University jhmin@kookmin.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Electronics Engineering Department, Kookmin University ypark@kookmin.ac.kr, 중신회원

* Electronics Engineering Department, Kookmin University, 학생회원

논문번호 : 202104-093-B-RN, Received April 26, 2021; Revised June 7, 2021; Accepted June 30, 2021

connected to other nodes via the 10Base-T1S Ethernet bus. Meanwhile, the CAN packet time delay problem that may occur due to the Ethernet protocol was solved by assigning priority to the packet, and the performance is evaluated.

I. 서 론

자율주행, 전기차 등 자동차 기술이 발전하면서 차량에 들어가는 ECU (Electronic Control Unit) 개수와 통신 속도가 증가하게 되었다. 차량용 통신은 자동차 내의 전자장치들 간의 통신을 위해 사용된다. 자동차 내의 전자장치들은 몇 개의 도메인으로 나눌 수 있으며, 파워트레인, 새시, 바디, 운전자 보조 시스템, HMI 등으로 분류된다. 일반적으로 각각의 도메인들은 독립적으로 기계적, 전기적, 또는 컴퓨터 제어를 하지만 도메인 간 상호 작용 역시 증가하고 있다. 파워트레인 도메인은 자동차를 주행하기 위해 동력을 생산하는 구성 요소들로, 엔진, 클러치, 변속기 등이 여기에 속한다. 새시는 엔진 외에 운전이 필요한 브레이크, 조종 장치, 서스펜션 등과 파워트레인을 보조하는 내부의 뼈대를 포함한다. 바디 도메인은 히터, 에어컨, 좌석 제어, 창문 제어, 조명 등을 포함하며, 운전자 보조 시스템(Driver Assistance System)은 운전 과정에서 운전자를 돕고 운전자와 승객, 보행자의 안전성을 높이기 위해 설계된 시스템으로, 내비게이션, 크루즈 컨트롤, 자동 주차 시스템이 이에 포함된다. 이 시스템들은 일반적으로 각자 센서들과 전용의 컴퓨터가 포함되어 있어 주로 파워트레인, 새시, HMI(Human-Machine Interface) 등의 다른 시스템과 상호 작용한다¹⁾. 이 도메인들은 각 센서들과 다양한 표준 방식으로 통신하고, 도메인에 따라 요구하는 통신 지연시간 기준이 다르다. HMI나 운전자 보조 시스템 같이 수 msec 단위의 지연시간을 요구하는 도메인이 있는 한편, 파워트레인, 새시와 같이 수 μ sec 단위의 짧은 지연을 요구하는 도메인도 존재한다. 첨단 운전자 보조 시스템(ADAS)의 도메인 컨트롤러의 경우 CAN, FlexRay, 이더넷이 함께 쓰이기도 한다²⁾.

CAN(Controller Area Network) 통신은 1980년대에 개발된 대표적인 차량용 통신 표준으로, 현재 대부분의 자동차, 기차, 배 등의 운송기관과 산업 제어 시스템에서 사용되고 있는 버스 토폴로지 형태의 통신이다. 그러나 1 Mbps라는 낮은 전송 속도와 한 번에 최대 8 바이트의 데이터만을 전송하는 한계를 가지고 있다³⁾. 한편, ADAS, 인포테인먼트, 자율주행 등을 위해 도입된 차량용 이더넷 100Base-T1은 IEEE

802.3bw에 표준화된 이더넷으로, 차량 내 전자장치들이 점점 더 많은 센서와 제어장치를 사용함에 따라 요구되는 더 넓은 대역폭 조건을 만족하기 위해 개발되었다. 1쌍의 케이블로 차량 내 환경에서의 EMI (Electromagnetic interference) 조건을 충족하며, 100 Mbps의 속도와 전이중 통신을 지원한다. 100Base-T1은 CAN보다 고속으로 더 많은 데이터를 전송할 수 있다는 장점이 있지만, CAN에 비해 가격이 비싸고 자동차 전체에 전면적으로 도입하기엔 어렵다는 단점이 있다. 또한 100Base-T1은 기존에 차량 내에서 사용된 CAN, FlexRay, LIN, MOST 등과 달리 전체 접속 형태가 중앙 제어장치라는 단일 장치와 점대점으로 연결되는 스타형 구조를 사용하여 기존의 구조와 차이점이 크기 때문에 배선의 난이도가 증가한다⁴⁾. 노드의 개수가 증가할수록 필요한 이더넷 스위치의 개수와 스위치와 노드를 연결하는 케이블이 증가하여 비용이 증가하는 문제점도 존재한다.

또 다른 차량용 이더넷인 10Base-T1S는 10 Mbps 속도로 동작하는 싱글 페어 이더넷 물리 계층에 관한 표준인 IEEE 802.3cg에서 표준화된 이더넷으로서 점대점 방식의 전이중 통신, 반이중 통신, 버스 토폴로지 방식의 반이중 통신을 모두 지원하는데, 10Base-T1S의 버스형 반이중 통신 모드에서는 PLCA(Physical Layer Collision Avoidance) 기능을 지원한다. 그림 1은 10Base-T1S의 물리 계층을 OSI-7 계층 레퍼런스 모델로 나타내고 있다⁵⁾. 그림에서 RS 부계층은 MAC 계층에서 송신 요구된 프레임의 비트열을 4비트의 nibble 단위로 된 스트림으로 변환하여 MII를 통하여 전달하는 기능을 수행한다. 또한 PLS/PCS는 라인코딩을 담당하며, MII는 충돌감지 신호, 캐리어감지 신호, 송수신클럭, 송수신 오류 신호 등을 전달받아 MAC과 PHY를 연결하는 접속부이다⁶⁾. PLCA는 OSI-7 계층 모델의 RS 부계층 (Reconciliation Sublayer)에서 지원하는 기능으로, MAC(Media Access Control)과 MII(Media Independent Interface) 사이에서 신호를 조절하여 물리 계층에서의 충돌을 막아준다. 즉, PLCA는 각 노드에 ID를 부여하고 전송 기회를 할당하여 노드마다 자신의 순서에만 데이터를 전송할 수 있도록 한다. 각각의 노드는 자신의 전송 기회 동안에만 패킷을 보낼 수

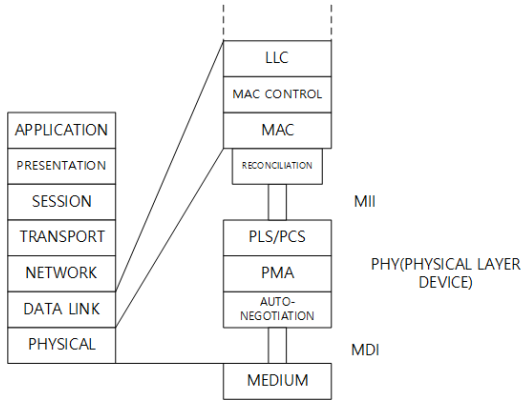


그림 1. 10Base-T1S의 물리 계층 OSI 레퍼런스 모델
Fig. 1. OSI reference model of physical layer in 10 Base-T1S

있고, 경우에 따라 개별적으로 자신의 전송 기회일 때 추가적으로 패킷을 전송할 수도 있다. 따라서 매질에서는 물리적인 충돌이 발생하지 않아 부하가 큰 버스형 네트워크에서도 낮은 지연시간을 가지고 통신할 수 있다는 장점이 있다.

현재 차량 내에는 CAN과 이더넷이 독립적으로 네트워크를 구성하고 있으며, 자동차 내에서 사용빈도가 가장 높은 CAN과 이더넷 간의 연동을 위한 게이트웨이 또는 도메인 컨트롤러에 관한 연구가 계속되고 있다⁷⁾. 본 연구에서는 두 통신 방식을 연결하는 CAN-over-Ethernet (CoE) 게이트웨이를 이용하여 CAN 통신과 10Base-T1S 이더넷을 통합한 네트워크를 제안한다. 10Base-T1S가 차량 내부 통신으로 적합한지에 관해서 각 노드에서 데이터를 생성하는 주기를 변경해가며 처리율과 지연시간을 시뮬레이션을 통해 측정할 연구가 진행되었다⁸⁾. 그러나 이 경우 PLCA 노드 사이에 우선 순위가 존재하지 않아 긴급히 전송되어야 하는 데이터가 전송 순서를 기다리느라 지연시간이 발생한다. 또한 이더넷 물리 계층에서 PLCA의 전송 순서를 기다리는 과정에서 발생하는 지연시간을 감소하기 위해 알람 신호를 발생시켜 중요 메시지가 먼저 전송되도록 하는 방법에 관한 연구가 진행되었다⁹⁾. 본 논문에서는 PLCA 패킷에서 알람 신호의 처리 방법을 구체화하고, 우선순위 지정에 따른 PLCA 프로토콜의 성능을 평가하였다. 또한 이더넷 노드와 CAN 노드가 통합된 네트워크에서 노드간 우선 순위를 적용하여 노드의 특성에 맞는 통신 방식을 제시하고, 네트워크의 부하에 따른 노드별 전송성능을 시뮬레이션을 통해 확인했다. CAN 버스에서 CoE 게이트웨이로 전달된 CAN 프레임은 이더넷 패킷의 페

이로드 안에 포함되어 이더넷 버스로 전달되며, PLCA 이더넷에 연결된 노드들에는 미리 할당된 전송 순서에 따라 패킷이 전송되므로 자신의 순서가 되기 까지 기다리는 과정에서 지연시간이 발생한다. 따라서 저지연이 필요한 패킷의 경우 높은 우선순위를 할당하고, 자신의 순서를 기다리지 않고 우선적으로 보낼 수 있도록 함으로써 지연을 줄이는 방식을 제안하였다. 본 연구에서는 위 상황에서 우선 순위에 따른 지연시간 및 처리율을 분석한 결과를 제시한다. 또한 특정 ID 신호에 우선권을 허용하여 다른 노드가 방해하지 못하도록 하는 방법을 제안하고 성능을 확인했다.

II. CAN-over-Ethernet을 이용한 차량용 통신 네트워크

차량용 이더넷 100Base-T1은 ECU(Electronic Control Unit)와 이더넷 스위치가 1:1로 연결되는 스타형 구조 (star topology)를 갖는다. 스위치를 사용한 점대점 통신의 장점은 기존의 버스 구조에서 벗어나 충돌과 지연 문제를 해결했다는 점이다. 기존의 버스 구조 이더넷은 CSMA/CD (Carrier sense multiple-access/collision detection) 프로토콜과 백오프 (Back-off) 알고리즘에 의해 충돌 발생 시 임의의 시간 동안 지연 후 재전송한다. 재전송하는 패킷에 우선권을 따로 주지 않기 때문에 재전송 시에도 충돌이 발생하면 지연시간이 계속 증가하게 된다. 그러나 차량 내 통신의 지연은 경우에 따라 안전에 문제가 될 수 있으므로 기존의 CSMA/CD 프로토콜 기반의 버스 형태 이더넷은 차량 내에 사용하기에 부적절하다. 그러나 점대점 구조로 일대일 통신이 가능한 100Base-T1은 패킷이 매체에서 서로 충돌하는 일이 발생하지 않기 때문에 이러한 문제를 회피한다. 각각의 링크는 점대점으로 연결된 전용 경로이기 때문에, 반송파를 감지하거나 충돌을 탐지할 필요가 사라져 MAC 계층의 작업이 쉬워지며, 설치와 재구성, 결함이 발생한 노드의 식별과 분리가 쉽다는 장점이 있다¹⁰⁾. 그러나 스타형은 전체 접속 형태가 중앙 제어장치라는 단일 장치에 좌우되기 때문에 이 스위치가 망가지면 전체 시스템에 문제가 발생하는 단점을 가지고 있다. 또한 각 노드가 중앙과 연결되어 있어야 하기 때문에 링형이나 버스형 같은 접속 형태보다 많은 케이블 연결이 필요하다. 차량 내 ECU 개수가 증가할수록 필요한 스위치의 개수 역시 증가하게 되고, 비용이 상승한다는 단점도 가지고 있다. 더불어 기존에 차량 내에서 사용된 CAN, FlexRay, LIN, MOST 등의 접속 형태는 모든

장치가 케이블에 연결되어 전달 매체를 공유한다. 기존의 버스형 접속형태의 경우 하나의 긴 케이블이 네트워크상의 모든 장치를 연결하는 중추 역할을 하고, 다양한 길이의 유도선에 의해 노드에 연결되기 때문에 설치하기 쉽고 적은 양의 케이블을 사용한다는 장점이 있다. 이렇듯 기존의 구조와 점대점 연결의 스타형 구조는 많은 차이점이 있다.

한편, 이런 단점을 보완하기 위해 제안된 10Base-T1S 이더넷은 버스형 접속 형태에서 동작하는 PLCA 프로토콜을 이용하여 MII로부터 받은 COL과 CRS 신호, 그리고 자신의 ID 값에 따라 노드가 자신의 전송 기회에만 패킷을 전송할 수 있도록 MAC에 충돌 신호를 전달하여 송신을 중단하는 방법을 통해 충돌을 회피한다. PLCA 기능을 가진 노드는 PLCA 기능을 사용하지 않는 노드와 같은 버스에서 함께 사용될 수 있으며, PLCA 기능을 사용하지 않는 노드의 비율이 증가할수록 성능은 감소한다. 또한 PLCA 기능은 동작 유무를 유동적으로 바꿀 수 있으며, PLCA 기능을 사용하지 않을 시 일반적인 CSMA/CD 프로토콜을 사용하는 버스형 이더넷과 동일하게 작동한다.

PLCA는 각 노드에 ID를 부여하고 라운드-로빈(Round-robin) 방식으로 모든 노드에 한 사이클에 한 번씩 전송 기회를 부여한다. 그림 2는 (N+1)개의 노드가 PLCA에 따라 전송 기회를 가졌을 때의 전송순서를 나타낸다.

이때 각 노드에 할당된 전송 기회 ID를 local_nodeID라고 하고 현재 전송 기회를 가진 노드의 ID를 curID라고 한다. 각 local_nodeID는 중복 없이 하나만 존재하며, 이 중 local_nodeID = 0인 노드가 비콘(beacon)을 보내 사이클을 시작한다. 모든 노드가 전송 기회를 가진 후 다시 local_nodeID = 0인 노드가 비콘을 전송하고 사이클을 반복한다. 만약 curID가 local_nodeID와 같고 MAC에서 패킷을 전송할 준비가 되었다면 해당 노드는 전송 기회를 가지고 COMMIT 신호를 전송한 후 패킷을 전송한다. 만약 curID가 local_nodeID와 같지만 MAC에서 패킷을 전송할 준비가 되지 않았다면 해당 노드는 to_timer가

끝나길 기다리고, 타이머가 끝나면 전송 기회를 다음으로 양보하여 curID를 1만큼 증가한다. to_timer는 1에서 255 사이의 정수 값과 비트 타임으로 표현되며, 기본 값은 32 비트 타임이다. PLCA에 의한 최소 및 최대 사이클은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 식에서 R_b 는 PLCA 이더넷의 전송속도, $N+1$ 은 총 노드 개수, T_{beacon} 은 비콘 전송을 위한 시간, T_{to} 는 각 노드에서의 대기시간, T_{commit} 은 각 노드에 전송 기회 사용을 알리는 데 걸리는 시간, $T_{Eth,max}$ 는 최대 이더넷 패킷 전송 시간을 각각 의미하며, 이때 최대 이더넷 패킷 전송 시간은 Interpacket Gap (IPG)을 포함한다. 최소 사이클은 비콘을 전송한 후 모든 노드가 전송 기회를 양보했을 때 발생하며, 최대 사이클은 모든 노드가 COMMIT 신호를 보내고 최대 크기의 패킷을 전송할 때 발생한다. $R_b=10$ Mbps, $N=7$, $T_{beacon}=20$ bit, $T_{to}=32$ bit, $T_{commit}=5$ bit, $T_{Eth,max}=1538$ Byte를 고려하면 최대 사이클은 약 9.8 msec가 되며 빠른 통신을 원하는 노드에서는 적합하지 않음을 알 수 있다.

$$\begin{cases} T_{cycle,min} = \frac{1}{R_b} \{ T_{beacon} + (N+1) \cdot T_{to} \} \\ T_{cycle,max} = \frac{1}{R_b} \{ T_{beacon} + (N+1) \cdot (T_{commit} + T_{Eth,max}) \} \end{cases} \quad (1)$$

PLCA는 CAN, LIN, MOST 등 기존에 차량 내에서 사용되고 있는 다양한 통신 프로토콜을 이더넷이라는 하나의 프로토콜로 대체하는 가능성을 제시하지만, 기존의 많은 노드가 CAN 프로토콜로 연결되어 있기 때문에 이더넷만으로 차량 내 모든 통신을 하기에는 많은 시간이 소요될 것이다. CAN 통신과 차량용 이더넷을 함께 이용하기 위해서 현재는 그림 3(a)와 같이 서로 독립된 네트워크를 사용한다. 반면에 본 논문에서 제안하는 CoE 컨버터를 이용하여 CAN 통신과 이더넷을 통합한 네트워크는 그림 3(b)와 같이 나타낼 수 있다. 그림 3(a)와 같이 CAN 통신과 차량용 이더넷이 독립적인 네트워크 배선을 사용하는 경우 두 노드를 연결하는 케이블이 차량 내에서 공통된 경로에 놓이더라도 별개의 케이블을 사용하여 연결해야 하므로 케이블 길이와 중량이 증가하고 공간이 낭비되는 단점이 있다. 차량 내부 통신에 사용되는 케이블 하네스는 엔진과 새시 다음으로 차량 내에서 세 번째로 무겁고 고가이며 하네스의 중량은 엔진 효율에도 영향을 미치기 때문에 그림 3(b)와 같이 두 네트워크를 통합하여 배선을 줄이면 중량을 감소할 수 있다. 또한 점대점 방식을 사용하는 전이중 방식의 이더넷의 경우 물리 계층에서 다른 노드와의 충돌을 배제할

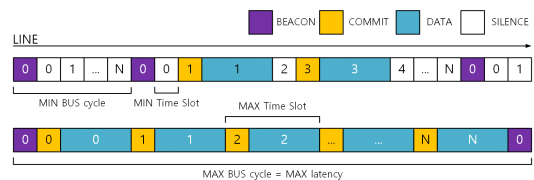


그림 2. PLCA 이더넷에서 각 노드 전송 순서
Fig. 2. Transmission sequence of each node in PLCA Ethernet

수 있지만, 노드가 늘어날수록 노드와 스위치를 연결하는 케이블의 수 역시 증가하는 단점을 가지고 있다. 차량에 기존의 버스 토폴로지 형태의 고속 이더넷을 사용하지 못하는 이유 중에는 버스에서 다른 노드와 충돌을 일으킬 때 백오프 알고리즘으로 인해 지연시간이 길어지는 문제가 있었는데, PLCA를 사용하여 물리적 충돌을 방지한다면 이 문제를 해결할 수 있다.

CAN 통신과 이더넷을 CoE 게이트웨이로 연결한 네트워크를 나타낸 그림 3(b)의 단점은 게이트웨이를 통과한 CAN 통신 메시지가 지연될 수 있다는 점이다. CAN 통신은 CSMA/CR 방식으로 프레임 중재영역의 ID에 따라 우선순위를 결정하고, 프레임이 충돌할 시 우선순위가 높은 프레임은 지연 없이 전송을 계속하는 장점을 가지고 있다. 그러나 CAN 메시지가 게이트웨이를 거쳐 PLCA 버스를 통해 전송되는 경우 자기 노드 차례가 오기까지 대기하는 과정에서 지연시간이 증가하는 문제가 있다. 본 논문에서는 노드별로 우선순위를 다르게 하여 높은 우선순위의 패킷을 우선적으로 처리하는 방법으로 이 문제를 해결하였다.

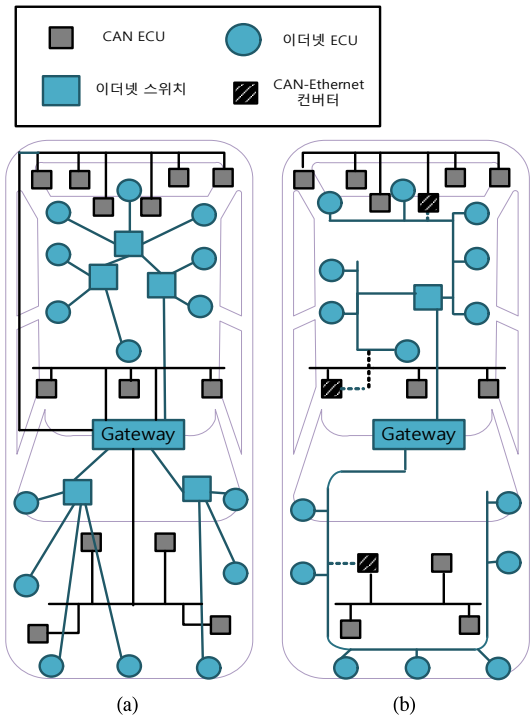


그림 3. CAN, 이더넷 통합 전/후 차량내 통신 네트워크 (a) 통합 전 (b) 통합 후
Fig. 3. Intra-vehicle communication network before/after integration of CAN and Ethernet (a) before integration (b) after integration

III. CAN-over-Ethernet 알고리즘 제한

CoE 게이트웨이는 그림 3(b)에서처럼 CAN 버스와 PLCA 이더넷 버스를 연결한다. 이더넷 버스에 연결된 모든 이더넷 노드는 10 Mbps의 속도로 패킷을 전송하며, 모두 PLCA 기능을 사용하는 노드로 가정한다. 또한 BEACON, COMMIT 신호에 더해 우선순위가 부여된 패킷이 있다는 걸 알리는 PRIORITY 신호를 추가한다. PRIORITY는 PLCA 노드의 curID의 동기화에 사용되며, 이때 게이트웨이의 PLCA nodeID는 prtyID로 정의한다. 그림 4는 제안된 알고리즘을 반영한 PLCA 제어 상태를 나타낸다. 게이트웨이와 연결된 CAN 버스에서 이더넷 버스를 거쳐 다른 노드로 전송해야 하는 프레임이 발생할 경우 게이트웨이는 해당 프레임을 이더넷 패킷으로 캡슐화하고 PRIORITY 신호를 전송한다. CoE 노드를 제외한 노드는 CoE 노드가 전송할 프레임이 있는지 확인하는 동안 COMMIT 신호를 송신하지 않고 일정 시간 대기한다. PRIORITY 신호를 수신한 노드는 PRTY 변수를 TRUE로 설정하여 다음에 COMMIT을 전송할 노드가 CoE 노드라는 사실을 인지한다. 우선순위가 부여된 게이트웨이의 패킷은 지연시간 기준을 엄수하기 위해 curID가 local_nodeID가 아닐지라도 순서를 양보 받아 우선 처리하도록 한다. 따라서 curID가 자신의 ID가 아니어도 PRIORITY 신호를 보낸 뒤 COMMIT 신호를 보낸다. 만약 이때 'curID =

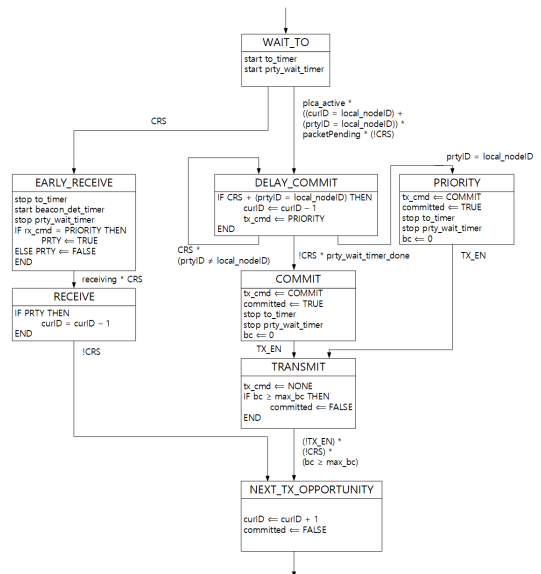


그림 4. PLCA 제어 상태도
Fig. 4. State diagram of PLCA control

local_nodeID'인 노드에서 패킷을 보내고자 한다면 CoE 노드의 전송이 끝나 'CRS = FALSE'가 될 때까지 대기하도록 한다. 우선순위가 부여된 CoE 노드 데이터가 발생하기 전에는 이전과 전송 순서가 동일하지만, CoE 노드 데이터가 발생하면 CoE 노드가 먼저 PRIORITY 신호와 COMMIT 신호 및 패킷을 전송하고 전송이 끝난 다음에 원래 차례였던 2번 노드가 COMMIT 신호와 패킷을 전송한다.

그림 5는 CoE 노드 데이터가 발생하기 전후의 전송 순서 변화를 나타낸다. 우선 순위가 부여된 CoE 노드 데이터가 발생하기 전에는 이전과 전송 순서가 동일하지만, CoE 노드 데이터가 발생하면 CoE 노드가 먼저 PRIORITY 신호와 COMMIT 신호 및 패킷을 전송하고 전송이 끝난 다음에 원래 차례였던 2번 노드가 COMMIT 신호와 패킷을 전송한다.

그림 6(a)는 CAN 프레임에 포함된 CoE 이더넷 패킷의 구조를 나타낸다. CoE 패킷의 데이터 영역은 CAN 버스에서 CoE 게이트웨이로 전송된 CAN 프레임을 포함하고, 패킷 타입은 해당 CAN 프레임이 CAN 2.0A, CAN 2.0B, CAN-FD 중 어떤 형식의 CAN 프레임인지, 새시, 파워트레인 등 어느 영역의 CAN 버스에 연결되었는지 등의 정보를 가진다. CAN 2.0A와 2.0B는 최대 8 바이트의 데이터를 가지며, 그 중 CAN 2.0A는 비트 스테어링을 고려했을 때 프레임의

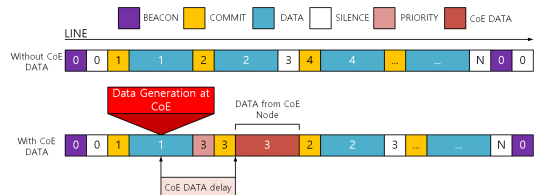


그림 5. CoE 패킷 발생 시 PLCA 전송 순서
Fig. 5. Transmission sequence of PLCA with CoE packet generation

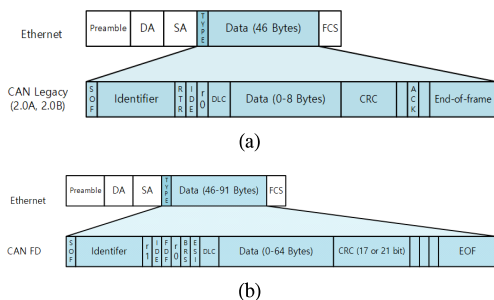


그림 6. CoE 패킷의 구조 (a) CAN 패킷 매핑 (b) CAN FD 패킷 매핑
Fig. 6. Structure of CoE packet (a) CAN packet mapping (b) CAN FD packet mapping

최대 크기가 134 비트이고, CAN 2.0B의 경우 비트 스테어링을 고려한 최대 크기는 156 비트이다¹¹⁾. 두 프레임 다 이더넷 패킷 데이터 영역의 최소 크기 46 바이트에 비해 작기 때문에 부족한 영역은 패딩을 사용하여 최소 크기를 맞춘다. 따라서 CAN 2.0A와 CAN 2.0B 프레임이 포함된 CoE 패킷은 Preamble(8) + Destination Address(6) + Source Address(6) + Type(2) + Data(46) + FCS(4)로 구성되어 72 바이트의 크기가 된다. 그림 6(b)는 CAN FD 프레임을 포함한 CoE 이더넷 패킷을 나타낸다. CAN FD 프레임은 최대 64 바이트의 데이터를 포함하고, 비트 스테어링을 고려했을 때 최대 크기는 727 비트이다. 따라서 CoE 패킷의 데이터는 최대 91 바이트가 되며, CoE 이더넷 패킷의 전체 크기는 프리앰블, 주소, 타입, FCS을 포함하여 최대 117 바이트의 크기를 갖는다.

IV. 제안된 하이브리드 네트워크 성능 평가

본 논문에서는 제안된 CAN-Ethernet 하이브리드 네트워크의 성능평가를 위해 MathWorks사의 Matlab을 사용하여 시뮬레이션을 하였으며, 7개의 이더넷 노드와 1개의 CoE 노드가 포함된 1개의 이더넷 버스에서 PLCA 방식에 따라 전송되는 패킷의 노드별 전달 지연시간과 처리량을 계산했다. 전송 지연과 버퍼에서의 대기 지연 외의 다른 지연시간은 고려하지 않았다. 그림 7은 시뮬레이션에 이용된 PLCA 이더넷 버스의 구조를 나타낸다. 각 노드는 1~8 사이의 local_nodeID를 가지며, 비콘을 보내는 노드의 아이디를 '01'로 하였고, CoE 노드는 local_nodeID '03'를 가지도록 설정했다. 표 1은 시뮬레이션에 이용한 파라미터들을 보여준다. 이더넷 속도는 10 Mbps를 가정하며 각 노드의 버퍼는 100 KByte로 설정했다. 각 노드에서 생성되는 패킷은 부하 크기와 푸이송 분포에 따른 주기를 가지며, 이더넷 노드와 CoE 노드는 각각 72~1526 바이트 및 72~117 바이트 크기의 패킷을 랜덤하게 생성하도록 하였다.

그림 8은 성능평가에 이용한 시뮬레이션 의사코드를 보여준다. 본 논문에서는 CoE 노드에 가장 높은 우선순위를 제공함으로써 CAN 통신을 통해 전달되

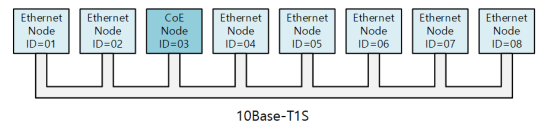


그림 7. 시뮬레이션에 이용된 PLCA 이더넷 버스
Fig. 7. PLCA Ethernet bus employed in the simulation

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Simulation Parameters	Value
Bit rate	10 Mbps
BEACON	20 bit
TO timer	32 bit
Number of Node	8(7 Ethernet, 1 CoE)
Payload	Normal: 46-1500 Byte CoE : 46-66 Byte
Queue Size	100 KBytes

```

generate Node;
while curTime < 5
    update Queue;
    if isempty(coeNode.queue) == 0 then
        delayTime = curTime - coeNode.genTime;
        curTime = curTime + coeNode.packetLength / bitRate;
        write PLCA TABLE;

        continue;
    end if;

    if isempty(curNode.queue) == 0 then
        delayTime = curTime - curNode.genTime;
        curTime = curTime + curNode.packetLength / bitRate;
        write PLCA TABLE;
    end if;

    if curNodeTO + 1 > plca_node_count then
        curNodeTO = 1;
        cycle = cycle + 1;
    else
        curNodeTO = curNodeTO + 1;
    end if;
end while;
    
```

그림 8. 제안된 CoE 포함 PLCA 이더넷 시뮬레이션을 위한 의사코드
Fig. 8. Pseudocode of simulation for the proposed PLCA Ethernet integrating CoE

는 각종 긴급신호의 지연을 최소화 하는 것이 목표이므로, 그림의 의사코드에서는 이를 위한 알고리즘을 제시한다. 버스의 각 노드는 푸어송 분포에 따른 주기에 맞춰 30,000개의 패킷을 생성(generate Node)한 후, 시간 변수 curTime에 맞춰 버퍼에 패킷을 입력한다 (update Queue). coeNode.queue는 CoE 노드의 버퍼를 의미하며, curNode.queue는 curNodeTO와 local_nodeID가 동일한 노드의 버퍼를 의미한다. CoE 노드에서 생성되는 모든 패킷은 우선순위를 부여받기 때문에 coeNode.queue 버퍼에 저장된 패킷이 있는지 우선 확인하고 버퍼에 저장된 패킷이 있다면 다른 노드의 전송 차례에 상관 없이 순서를 양보 받아 패킷을 전송한다. 전송 후에는 소요된 시간을 curTime에 더하고, 변화한 시각에 맞춰 모든 노드의 패킷 생성 시각을 다시 확인하여 패킷을 버퍼에 집어 넣는다. coeNode.queue가 비어 있다면 전송 기회를 그대로 유

지한 채로 curNode.queue에 패킷이 있는지 확인한다. 버퍼에 패킷이 있으면 전송을 시작하고, 한 사이클 내 모든 노드가 전송을 완료하면 전송 기회를 '1'로 되돌린다. 그렇지 않다면 전송 기회를 '1'만큼 증가시켜 순서를 넘긴다. PLCA TABLE에는 전송에 성공한 패킷의 크기와 생성 시각, 전송 시각 등을 기록하여 처리율과 지연시간을 계산하였다. 사용자의 안전을 위해서 최대 지연시간이 차량 내 통신의 지연 기준을 만족해야 하기 때문에 지연시간은 각 노드가 전송한 패킷들의 평균 지연시간과 최대 지연시간을 함께 측정했다.

위 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안하는 CoE을 이용한 하이브리드 이더넷의 성능을 평가하였다. 차량의 경우 다양한 노드가 존재하며 바다나 인포테이먼트 노드에 비해 새시 혹은 파워트레인 노드는 신

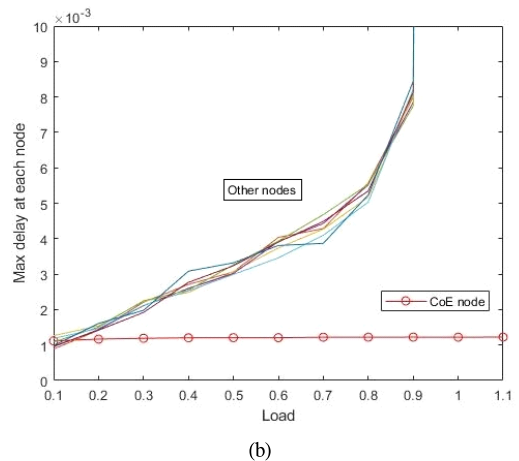
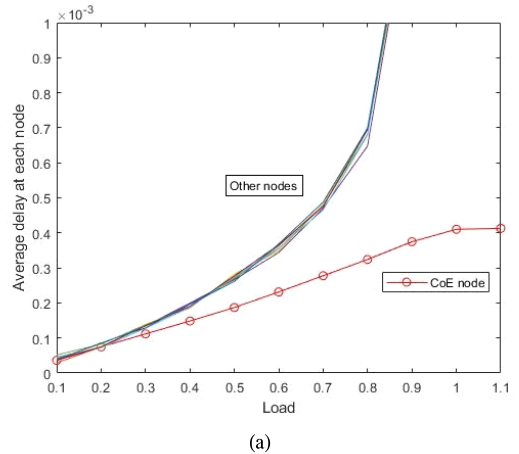


그림 9. 트래픽 부하에 따른 지연 (a) 평균 지연 (b) 최대 지연
Fig. 9. Delay for different traffic load (a) average delay (b) maximum delay

호 지연에 매우 민감하다. 그림 9는 각 노드에서 생성된 부하를 모두 더한 버스의 전체 부하 변화에 따른 각 노드의 평균 및 최대 지연시간을 계산하여 보여준다. 그림 9의 CoE 노드는 본 논문에서 제안하는 CoE 게이트웨이 노드를 뜻하며, Other nodes는 CoE 노드 이외의 7개의 PLCA 이더넷 노드로서, 46~1500 바이트의 페이로드를 전송하는 노드에 해당한다. 이때 각 노드에서 발생하는 부하 크기는 비슷하게 설정하였으며, 전체 부하를 0.1부터 1.1까지 0.1씩 증가하며 시뮬레이션을 진행했다. 그림 9(a)는 각 노드의 평균 지연시간을 보이며, 총 부하가 0.9를 초과하면 CoE 노드가 아닌 다른 노드의 지연시간은 급격하게 증가하지만, CoE 노드의 평균 지연시간은 약 0.4 msec로 충분히 낮은 지연시간을 가진다. 그림 9(b)는 노드별 최대 지연시간을 보여준다. 최대 지연시간은 자신의 노드 전송 순서가 지나간 직후에 패킷이 생성되는 경우에 발생하므로 평균 지연시간보다 훨씬 큰 값을 갖지만 CoE 노드의 경우 1.22 msec를 초과하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 CoE 노드는 우선순위를 가지므로 언제 패킷이 생성되더라도 현재 전송중인 패킷의 전송 완료 이후에 즉시 전송이 가능하기 때문이며, 그림 10에서 이를 확인할 수 있다. 그림 10은 CoE 노드의 최대 지연과 최소 지연 발생 환경을 나타낸다. CoE 노드의 최대 지연시간은 CoE 노드의 큐에 패킷이 있을 때 앞서 패킷 전송을 시작한 노드가 이더넷 패킷의 최대 크기인 1526 바이트를 전송할 때 1.22 msec에 해당한다. 이를 통해서 PLCA 이더넷에 우선순위 노드를 지정하고 다른 노드의 발생 데이터에 비해 우선적으로 처리를 해줄 때 지연시간을 충분히 줄일 수 있으며, 전체 부하가 증가하더라도 긴급한 신호 전달에 이용될 수 있음을 볼 수 있었다. 또한 각 노드가 보내는 이더넷 패킷의 최대 크기를 제한하여 작은 크기의 세그먼트로 보낸다면 최대 전송지연시간을 더욱 줄일 수 있음을 알 수 있다.

그림 11은 부하에 따른 이더넷 버스의 처리율(throughput)을 나타낸다. 처리율은 네트워크의 대역폭을 얼마나 효율적으로 사용하는지를 나타내는 지표

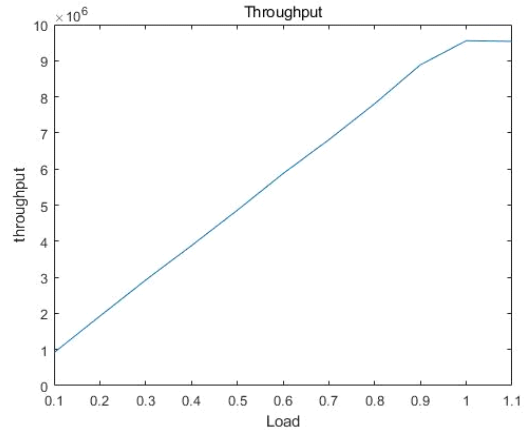


그림 11. 트래픽 부하에 따른 PLCA 이더넷 처리율
Fig. 11. Throughput of PLCA Ethernet for different traffic load

로, 어떤 지점을 데이터가 얼마나 빠르게 지나가는지 단위 시간당 전송되는 데이터 양을 측정하여 확인할 수 있다. 본 연구에서 처리율은 10 Mbps 속도로 전송된 전체 패킷 중 프리앰블, 주소, 타입, CRC 등을 제외한 페이로드의 합을 총 소요 시간으로 나누어 계산했다. 이더넷 패킷의 최대 크기는 1526 바이트이고, 페이로드는 최대 1500 바이트이므로 대역폭이 10 Mbps일 때 최대 처리율은 1500 bytes / 1526 bytes * 10 Mbps = 9.83 Mbps가 된다. 시뮬레이션 결과 처리율은 전체 부하가 증가할수록 따라 증가하다가, 전체 부하가 1일 때 9.5 Mbps로 포화가 되는 것을 알 수 있다. 이는 대역폭이 10 Mbps일 때 최대 처리율인 9.83 Mbps에 근접한 값으로, CSMA/CD 이더넷과 달리 PLCA 이더넷의 경우 시간다중화를 기본 프로토콜로 하기 때문에 충돌이 방지되어 대역폭 효율이 극대화된 것을 알 수 있다.

그림 12는 전체 부하에서 CoE 노드가 차지하는 부하 비율에 따른 지연시간을 보여준다. 일반 노드는 총 부하에서 CoE 노드가 차지하는 부하를 제외한 부하를 동등한 비율로 가지도록 설정하였다. 그림 12(a)는 모든 노드의 부하를 합한 총 부하가 각각 0.3, 0.5, 0.7, 0.9일 때, 총 부하 내에서 CoE 노드의 부하가 차지하는 비율이 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%인 경우 CoE 노드의 평균 지연시간을 나타낸다. 평균 지연시간의 경우 CoE 노드는 전체 부하가 0.3일 때 약 0.1ms, 0.5일 때 약 0.2ms, 0.7일 때 약 0.3 ms의 지연시간을 가지고 0.9일 때 약 0.4ms의 지연시간을 가졌다. 이를 통해서 우선순위를 갖는 CoE 노드는 전체 네트워크의 부하에 비례하여 지연시간이 증가하고,

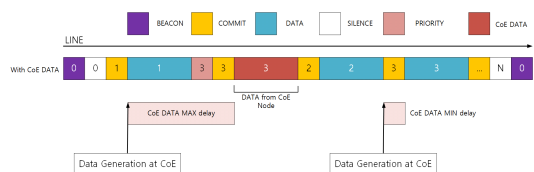
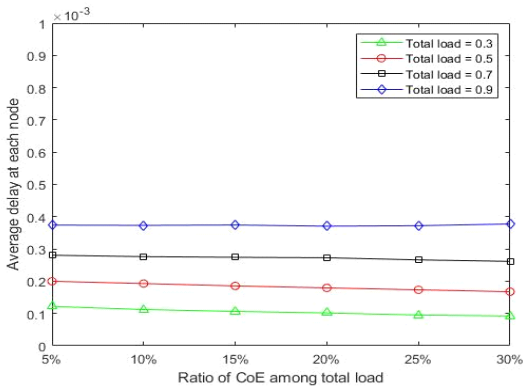
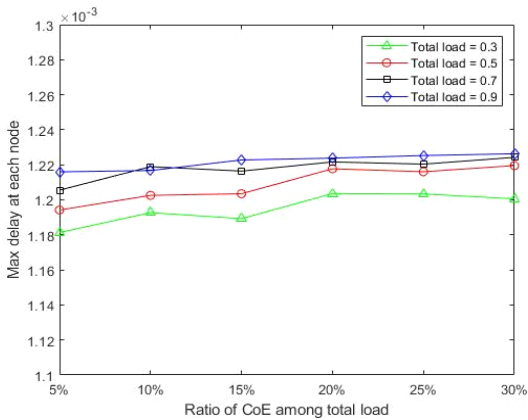


그림 10. CoE 패킷의 최대 및 최소 지연
Fig. 10. Maximum and minimum delay of CoE packet

CoE 노드 자신의 부하에는 크게 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다. 즉, 우선순위 노드의 부하 비율이 어느 정도 높아지더라도 성능에 저하를 주지 않음을 알았다. 한편 그림 12(b)는 같은 조건에서 CoE 노드의 최대 지연시간을 나타낸다. 최대 지연시간의 경우에도 전체 부하에 비례하여 커지는 것을 볼 수 있으며, CoE 노드가 차지하는 비율이 클수록 지연시간이 조금씩 증가하지만 그림 9(b)에서 보이는 1.3 msec 이하의 값에 수렴하는 것을 볼 수 있었다.



(a)



(b)

그림 12. CoE 노드 부하 비율에 따른 지연 (a) 각 노드의 평균 지연 (b) 각 노드의 최대 지연
 Fig. 12. Delay for different load ratio of CoE (a) average delay (b) maximum delay

V. 결론

본 논문에서는 CoE를 이용한 차량용 통신의 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. PLCA의 동작을 간략하게 구현하여 전송 지연과 대기 지연만을 고려

할 때 모든 노드들이 짧은 지연시간을 가지며, CoE 노드의 경우 이더넷 노드보다 더욱 짧은 지연시간을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 물론 실제 차량에 적용하기 위해서는 고려해야 할 요소와 지연시간이 많아 향후 더 많은 이더넷 버스와 이더넷 스위치를 추가하고 RS Layer을 더욱 구체적으로 구현한 평가를 진행해야 할 것이다. 또한 본 논문에서는 CoE 노드의 모든 패킷이 우선 순위를 가진다고 가정했지만, 우선 순위를 가지는 노드의 비율에 따른 지연시간 역시 시뮬레이션을 통해 확인 후 실제 회로로 구현했을 때의 지연시간을 측정하는 방향으로 연구를 계속할 예정이다.

현재는 차량 내에서 CAN, LIN, MOST, 차량용 이더넷 등 다양한 통신 방식이 함께 쓰이고 있지만 미래에 차량 내 통신의 백본으로 이더넷이 사용되는 것을 고려할 때, CoE 게이트웨이를 통해 CAN 통신과 이더넷을 연결하는 네트워크는 안전에 직접적으로 영향을 미치는 지연 등의 문제로 CAN이 사용되는 중요 ECU가 이더넷 ECU로 대체되는 데 징검다리 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] ixia, *Automotive Ethernet: An Overview* (2014), Retrieved Apr. 20, 2021, from https://support.ixiacom.com/sites/default/files/resources/whitepaper/ixia-automotive-ethernet-primer-whitepaper_r_1.pdf
- [2] G. Niedrist, *Deterministic Architecture and Middleware for Domain Control Units and Simplified Integration Process Applied to ADAS* (2016), Retrieved Apr. 20, 2021, from https://www.tttech-auto.com/wp-content/uploads/TTTech_Deterministic-Architecture-and-Middleware_2016.pdf
- [3] S. Corrigan, *Introduction to the Controller Area Network (CAN)* (2016), Retrieved Apr. 20, 2021, from <https://www.rpi.edu/dept/ecse/mps/sloa101.pdf>.
- [4] C. M. Kozierok, C. Correa, R. B. Boatright, and J. Quensnelle, *Automotive Ethernet - The Definitive Guide*, Intrepid Control Systems, pp. 175-176, 2014.
- [5] IEEE, "*IEEE Standard for Ethernet Amendment 5: Physical Layers Specifications*

and Management Parameters for 10 Mb/s Operation and Associated Power Delivery over a Single Balanced Pair of Conductors," IEEE 802.3cg, 2019.

- [6] J.-H. Yun, H.-H. Lee, S.-S. Kang, H.-W. Jeong, and T.-K. Kang, *Latest Ethernet*, 1st Ed., Kyohaksa, pp. 110-111, 2002.
- [7] G. Lee, S.-S. Do, and J.-H. Yun, "Automotive ethernet technology," *KICS Inf. and Commun. Mag.*, vol. 33, no. 1, pp. 54-62, 2015.
- [8] K. Kim, E. Choi, and J.-W. Choi, "Network performance evaluation of IEEE 802.3cg," *J. KICS*, vol. 45, no. 4, pp. 706-711, Apr. 2020.
- [9] B. Kim, "Research on priority-based PLCA in ethernet physical layer," M.S. Thesis, Dept. Electron. and Comput. Eng., Graduate School, Hanyang University, 2019.
- [10] B. A. Forouzan, *Data Communications and Networking*, 5th Ed., McGrawHill Education, pp. 54-62, 2015.
- [11] D. G. Hickman, "Speed up your calibration with CAN FD," *iCC 2013*, pp. 12-18, 2013.

정 소 영 (Soyoung Jeong)



2020년 : 국민대학교 공학사
2021년~현재 : 국민대학교 대학
원 전자공학과 석사과정
<관심분야> 딥러닝, 실내위치
인식, 광학카메라통신, 센서
네트워크

박 영 일 (Youngil Park)



1987년 : 서울대학교 공학사
1989년 : 서울대학교 공학석사
1995년 : Texas A&M Univ.
공학박사
1995년~1999년 : KT 연구개발
본부
1999년~현재 : 국민대학교 전자
공학부 교수

<관심분야> 광통신시스템, 광학카메라통신, 차량용
통신, 인공지능, 실내위치인식

[ORCID:0000-0002-9453-1034]

민 지 현 (Jihyeon Min)



2020년 : 국민대학교 공학사
2021년~현재 : 국민대학교 대학
원 전자공학과 석사과정
<관심분야> 차량용통신, 디지
털통신, FPGA디지털회로